第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

伊犁河—巴尔喀什湖流域实际蒸散发时空变化特征及其环境影响因子

姚 佳[1]， 陈启慧[1]， 李琼芳[1,2]， 崔 罡[1]， 张良憬[3]

（1. 河海大学水文水资源学院，江苏 南京 210098；2. 长江保护与绿色发展研究院，江苏 南京 210098；3. 河海大学环境学院，江苏 南京 210098）

摘 要：基于多种遥感数据，运用Mann-Kendall法、Theil-Sen median趋势分析、Pearson相关分析、水量平衡原理，探讨2000—2020年伊犁河—巴尔喀什湖流域实际蒸散发时空变化规律及其主要影响因素，并讨论了流域生态系统水资源供给量的变化。结果表明：（1）流域上、中、下游的多年平均年蒸散发量分别为439.0 mm、317.9 mm、201.1 mm；其中上、中游在夏季的日蒸散发量最大，而下游在春季最大；流域上、中游蒸散发量的年内分配均为"单峰型"，峰值分别在7月与6月，下游为"双峰型"，峰值分别在3月与11月。（2）流域上、下游的年蒸散发量均呈现显著的上升趋势，显著区域主要分布在上游的伊犁河谷、天山山脉与下游的伊犁河三角洲附近；相对2000—2010年，2010—2020年伊犁河谷和伊犁河三角洲地区多年平均年蒸散发增加超过10%。（3）流域上、中游蒸散发与气温和NDVI呈现较高的正相关性；流域下游蒸散发与土壤湿度呈现较高的正相关性。（4）流域生态系统的水资源供给服务总量在2000—2020年有所下降，其中上游已多次出现缺口，中、下游在2020年开始出现缺口，需通过控制用水总量、提升用水效率保障水资源供需平衡。

关键词：伊犁河—巴尔喀什湖流域；蒸散发；时空变化；驱动因素；Pearson相关

实际蒸散发（Evapotranspiration，ET）包括土壤蒸散发、植物截留水分蒸发和植被蒸腾，是陆地水文循环和能量循环的重要环节。位于干旱半干旱地区的伊犁河—巴尔喀什湖流域（简称"伊巴流域"）是我国与哈萨克斯坦之间的重要跨界流域，流域面积大且流域内地貌气候特征差异悬殊。随着近年来巴尔喀什湖（简称"巴湖"）水位波动[1-3]，伊犁河的三角洲生态环境变化[4-5]，水资源分配问题变得极为敏感。在全球气候变化和人类活动加剧的情况下，蒸散发作为干旱半干旱地区水量平衡中最大的支出项，其时空演变及驱动因素对伊巴流域的水资源分配与管理意义重大。

已有许多学者针对干旱半干旱区蒸散发时空变化及驱动因素开展研究。李修仓[6]通过研究3个不同气候区的典型流域发现，1961—2010年，塔里木河流域的实际蒸散发呈增加趋势，而珠江和海河流域的蒸散发呈下降趋势，且同等降水增幅条件下，塔里木河流域的降水对蒸散发贡献更大；刘洋等[7]利用相关性分析得出，中国西北干旱区1960—2019年的实际蒸散发呈现增加趋势，且主要受气温、相对湿度和风速的影响；Xia等[8]通过对东亚草原生态系统的研究得出，内蒙古锡林郭勒地区的蒸散发和降水相关性很高；Zhang等[9]研究发现，内蒙古中部和西部地区的蒸散发变化主要受相对湿度驱动；闫俊杰等[10]研究2001—2015年伊犁河谷草地蒸散发变化发现，多年平均ET为395.74 mm；植被覆盖度、降水及气温的降低均为草地ET降低的驱动因素；邓兴耀等[11]研究2000—2014年天山地区蒸散发发现，天山山区ET值的减小趋势是由区域降水量减少所致；梁红闪等[12]研究2000—2014年伊巴流域的蒸散量发现，流域实际蒸散发分布不均，境内部分多年平均年ET为401.18 mm，远高于境外的

收稿日期：2022-04-18； **修订日期：**2022-06-25
基金项目：新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心（院士专家工作站）合作研究项目（2020.E-001，2020.E-002，2020.E-004）；中央高校基本科研业务费项目（国际河流专项）（B210204024，B210204025，B210204026）
作者简介：姚佳（1998-），女，硕士研究生，研究方向为生态水文. E-mail: 2761566292@qq.com
通讯作者：李琼芳. E-mail: qfli@ hhu.edu.cn

194.45 mm,供水不足是制约流域植被蒸散最主要的因素。

干旱半干旱区不同流域的蒸散发变化受不同因素驱动,且前人在伊巴流域的蒸散发研究方面已取得相关研究成果,但由于数据源的不同、时间空间尺度的不同,尚未系统揭示伊巴流域的蒸散发演变特征及影响因子变化特征。因此,本文依据巴湖的主要水量来源——伊犁河来划分伊巴流域的上、中、下游,基于长序列的遥感资料,揭示环境变化下伊巴流域实际蒸散发的演变规律,并利用相关性分析剖析多重环境因子对其产生的影响,结果可为伊巴流域的水资源规划管理及中哈跨界水资源合理分配提供参考。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

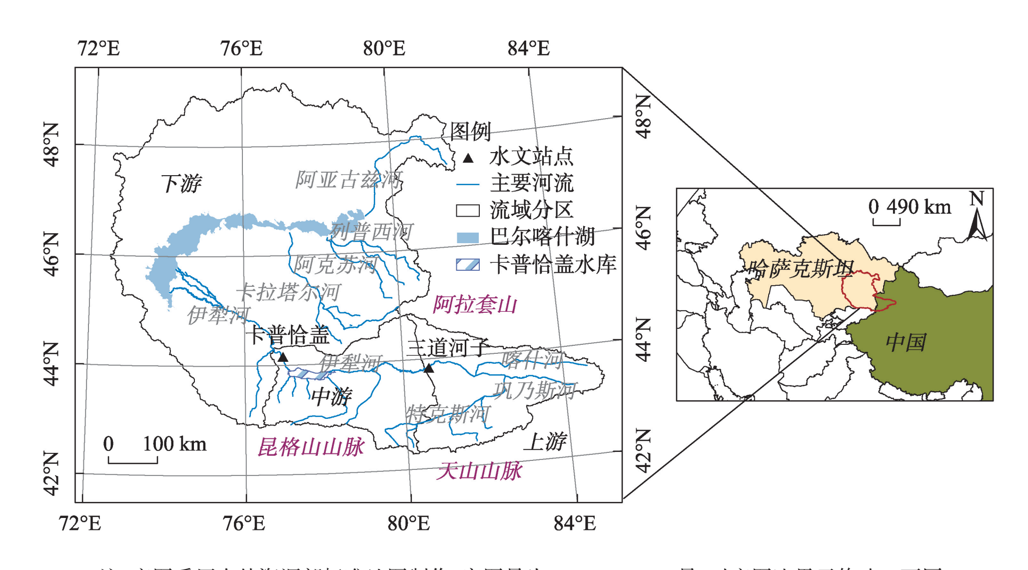
伊巴流域地理位置见图1。巴湖位于哈萨克斯坦的内陆湖,伊犁河的径流是其水量最重要的补给来源,占总入湖水量的78.4%[13]。伊犁河上游的天山地区是产流区,下游哈萨克斯坦境内则是径流的消散区。以伊犁河三道河子水文站和哈萨克斯坦的伊犁村(即现在的卡普恰盖镇水文站)为分界点,将伊犁河—巴尔喀什湖流域分为上、中、下游三部分,其中下游还包括除伊犁河外的卡拉塔尔河、阿克苏河、列普瑟河、阿亚古兹河的集水面积[1]。

流域高程、土地利用、植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)、降雨的空间分布见图2。由图2可见,流域高程落差极大,且降雨量从山区向平原减少现象极为明显,高山区多年平均降水量大于1000 mm,低山区年降水量为300~400 mm,巴湖沿岸年降水量仅为150 mm左右[14]。NDVI的高值区主要位于流域上游、中游高海拔地区及中下游交界处,而巴尔喀什湖周边除伊犁河三角洲外植被覆盖度极低,土地利用的空间分布也印证了NDVI的分布特征。

1.2　数据来源

1.2.1　ET、NDVI数据　首先,采用美国航空航天局(NASA)提供的APPEEARS工具(https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/)下载编号为MOD16A2GF(时空分辨率为8 d、500 m)的蒸散发数据和编号为MOD13C2(时空分辨率为月、0.05°)的NDVI数据;然后,经过去除无效值、重采样、研究区域提取和数据合并等预处理后,得到栅格大小为0.1°的月平均数据;最后通过Arcmap软件将各月的蒸散发数据进行逐像元计算,分别得到年与季节尺度的ET。

1.2.2　降雨、气温、相对湿度、风速数据　由NASA提供的饥荒预警系统网络土地数据同化系统(The Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System, FLDAS)数据集,提取研究区2000—2020年空间分辨率为0.1°的月降水、气温、相对湿度、风速数据。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5452号,对底图边界无修改。下同。

图1　伊巴流域地理位置

Fig. 1　Location of the Ili River-Balkhash Lake Basin

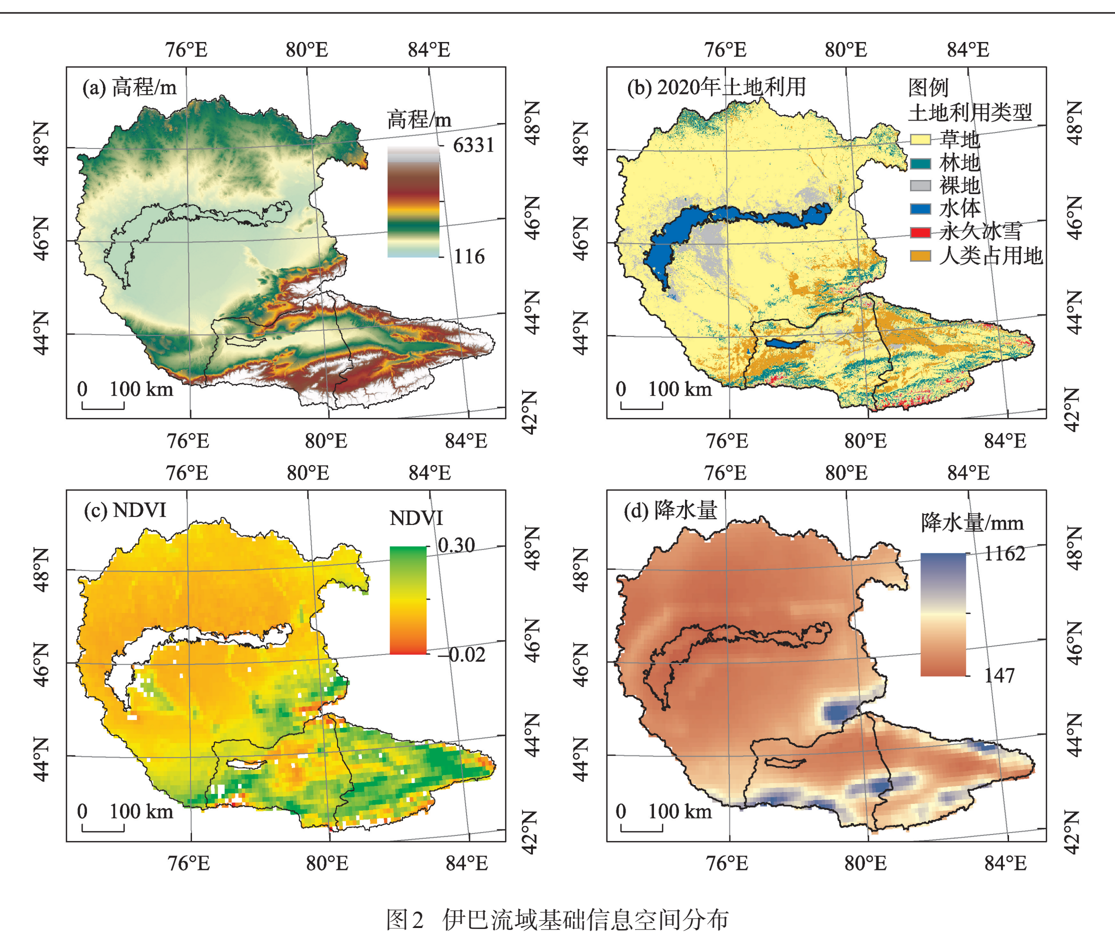


图2 伊巴流域基础信息空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of basic information in the Ili River-Balkhash Lake Basin

1.2.3 土壤湿度数据 NASA发布的全球陆地数据同化系统(The Global Land Data Assimilation System, GLDAS)提供土层厚度分别为0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm和100~200 cm的土壤湿度数据,为了反映影响ET的供水条件,同时考虑植被根系的生长深度,故从GLDAS中提取空间分辨率为0.25°的月尺度土壤湿度(10~40 cm)数据,经过Arcmap软件重采样得到空间分辨率为0.1°的月土壤湿度数据。

1.2.4 土地利用数据 土地覆被数据选用欧洲航天局(European Space Agency, ESA)气候变化倡议(Climate Change Initiative, CCI)与哥白尼气候变化服务(Copernicus Climate Change Service, C3S)提供的全球300 m分辨率土地利用产品(CCI-LC与C3S-LC)。按照李元春等[15]的土地覆被分类方法,将土地覆被重分类为草地、林地、裸地、水体、永久冰雪、人类占用地共6类,其中人类占用地包括耕地与城区。

1.3 研究方法

根据夏自强等[14]在该流域的研究,将四季划分为:春(4—5月)、夏(6—8月)、秋(9—10月)、冬(11月—次年3月)。首先,利用伊巴流域不同时间尺度的ET数据,计算面平均值得到上、中、下游及全流域的ET值;然后借助Mann-Kendall(M-K)法[16-17],分别计算逐栅格上、中、下游及全流域的蒸散发的Z值;基于Theil-Sen median趋势分析[18]计算上、中、下游月尺度ET与年尺度环境要素的年际变化率。最后计算每个栅格2010—2020年相对2000—2010年多年平均年ET的变化率,分析不同年代间ET的空间变化。

根据流域2000年和2020年的土地利用数据,依据土地利用转移矩阵原理[19]制作流域土地利用变化图,分析土地覆被变化对流域ET的影响。为了确定控制不同区域ET的主要环境因素,基于Pearson相关系数法[20]进行月ET与NDVI、气温、风速、相对湿度、土壤湿度5个环境影响因素之间的相关性分析。Pearson相关系数r可以衡量两变量间线性相关性,$|r|\in[0,1]$,$|r|\geq0.8$时为高度相关,$0.5\leq|r|<0.8$为中度相关,$0.3\leq|r|<0.5$为低度相关,$|r|<0.3$为不相

关。根据年尺度水量平衡[21-22],研究伊巴流域生态系统水资源供给量的变化。

2　结果与分析

2.1　流域蒸散发时空变化规律分析

2.1.1　年尺度

(1) 多年平均ET的空间分布

流域多年平均ET具有明显的空间分布特征(图3),东南高、西北低,最大值可达1028.6 mm,而最小值仅为117.6 mm。ET高值区主要位于卡拉塔尔河、阿克苏河上游、阿拉木图南部、喀什河和巩乃斯河流域等植被覆盖度较高的区域,其土地利用类型多为林地或耕地;ET低值区主要分布在巴湖周边平原地区及伊犁河中游低海拔地区。

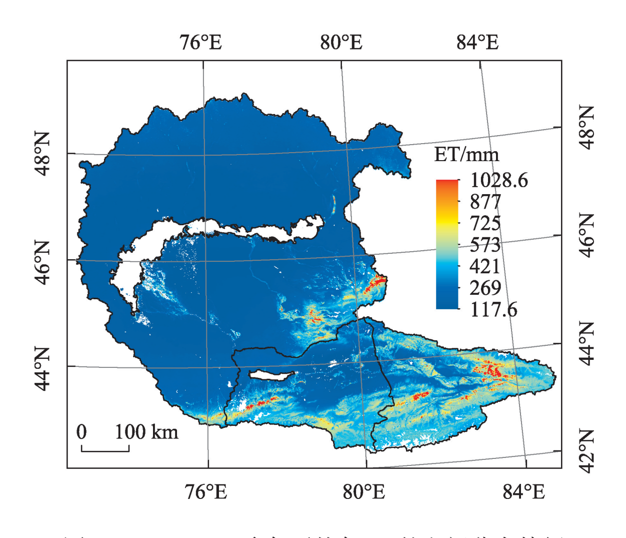


图3　2000—2020多年平均年ET的空间分布特征

Fig. 3　Spatial distribution characteristics of multi-year average evapotranspiration from 2000 to 2020

全流域多年平均年ET为249.7 mm,而上、中、下游多年平均年ET则分别为439.0 mm、317.9 mm、201.1 mm,比例近似于4:3:2,上、中、下游多年平均年ET存在显著差异。

(2) ET变化趋势空间分布

从图4来看,伊巴流域大部分区域年ET呈增加趋势,其中在上游伊犁河谷及天山山脉的大部分地区通过99%的显著性检验;在伊犁河谷的周边区域,年蒸散发量呈下降趋势,但不显著;上游蒸散发的变化趋势与王倩等[23]提出的上游植被生长季NDVI的空间变化特征具有一致性。在伊犁河中游地区,绝大部分面积的年ET变化趋势不显著;在伊犁

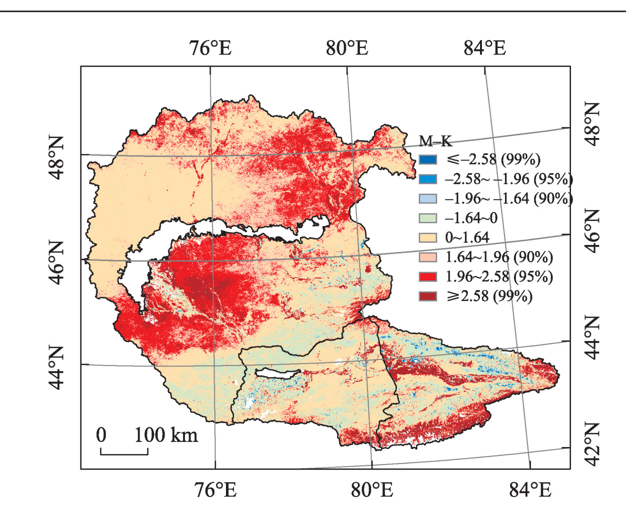


图4　2000—2020年蒸散发的M-K趋势检验Z值的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of M-K trend test Z-values for evapotranspiration from 2000 to 2020

河下游的三角洲周边地区及巴湖的东北部,年ET呈增加趋势,且通过了95%的显著性检验。

(3) 上、中、下游年ET的变化趋势

伊巴流域上、中、下游和全流域年ET的年际变化(图5)规律相似,均呈增加趋势,其在2000—2020年间的平均增幅分别为18.32 mm·(10a)$^{-1}$,8.07 mm·(10a)$^{-1}$,10.35 mm·(10a)$^{-1}$和12.22 mm·(10a)$^{-1}$。上、下游和全流域年ET的M-K趋势检验Z值分别为1.74、1.96和1.96,分别通过了90%、95%和95%的显著性检验,中游蒸散发量增加趋势不显著。

2.1.2　季节尺度

(1) 季节尺度ET的空间分布

由图6可知,全流域春、夏、秋、冬四季的多年平均日蒸散发量分别为:0.91 mm、0.92 mm、0.60 mm和0.72 mm,而上游四季的分别为:1.36 mm、2.47

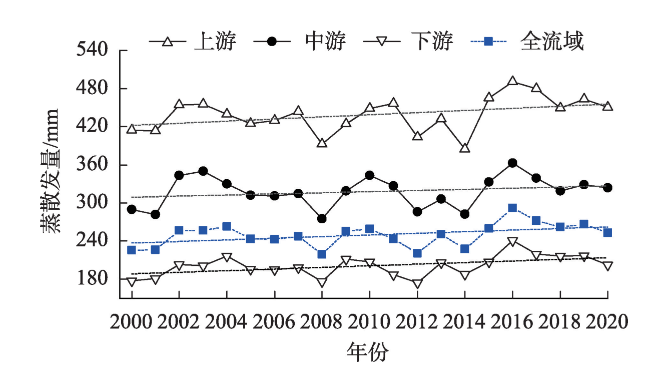


图5　流域上、中、下游年蒸散发总量年际变化

Fig. 5　Interannual variation of total evapotranspiration in the upper, middle and lower basin

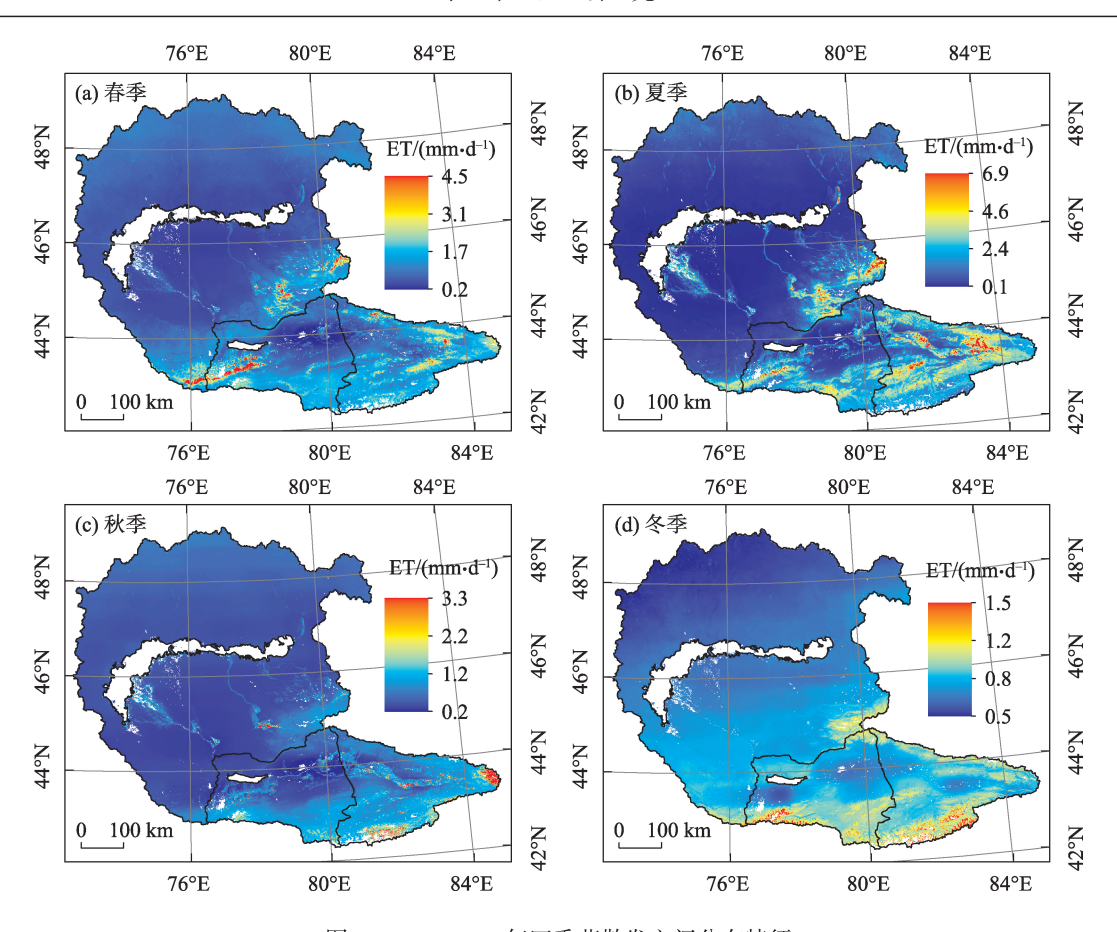


图6 2000—2020年四季蒸散发空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of seasonal evapotranspiration from 2000 to 2020

mm、0.98 mm和0.89 mm，中游的分别为：1.12 mm、1.37 mm、0.68 mm和0.85 mm，下游的分别为：0.79 mm、0.54 mm、0.51 mm和0.67 mm。就全流域而言，春、夏两季的多年平均日蒸散发量几乎相同，秋、冬两季的则小一些。上、中游均是夏季的多年平均日蒸散发量最大，而下游则是春季的多年平均日蒸散发量最大。从高程和NDVI的空间分布（图2a，图2c）来看，四季ET高值区均主要分布在海拔较高且植被覆盖度较高的地区，但在夏、秋两季，伊犁河谷地区也呈现较高的日均蒸散发量，这是由于伊犁河谷地区的土地利用类型主要为耕地，且当地在3月下旬至4月上旬才进入播种阶段[24-25]，故春季伊犁河谷的日均蒸散发量较低，而伊犁河谷外天然植被覆盖度较高的区域，则在春季呈现出较高的日均蒸散发量。

（2）季节尺度蒸散发变化趋势空间分布

2000—2020年四季蒸散发M-K趋势检验*Z*值的空间分布见图7。上游伊犁河谷地区蒸散发在夏、秋两季呈增加趋势，天山山脉地区蒸散发在春、夏、秋三季呈增加趋势，且两区域的大部分面积通过了99%的显著性检验；中游大部分地区蒸散发在四季中均呈增加趋势，但不显著；下游巴湖周边区域的蒸散发在春、夏、秋季呈增加趋势，且大部分面积通过了95%的显著性检验。冬季流域上中游、中下游交界处的大片区域蒸散发呈不显著上升趋势，而巴湖北部局部地区的蒸散发呈下降趋势，且通过了95%的显著性检验。

2.1.3 月尺度 由图8可知，上、中、下游ET的年内分配呈现不同变化特征，上、中游ET的年内分配为单峰，其中上游在7月达到峰值81.1 mm，中游在6月达到峰值43.5 mm。上游ET的峰值相较于中游有偏高偏晚的分布特征，与上、中游作物种植结构和种类不同有关[26]。下游ET的年内分配为双峰，在3月达到峰值后开始下降至9月，而后又开始上升至11月，达到另1个峰值后再次下降，其中3月和11月的峰值分别为29.9 mm和24.4 mm。

流域不同月份蒸散发的年际变化率见表1。流域上、下游的年ET呈上升趋势，主要是由于春、夏、

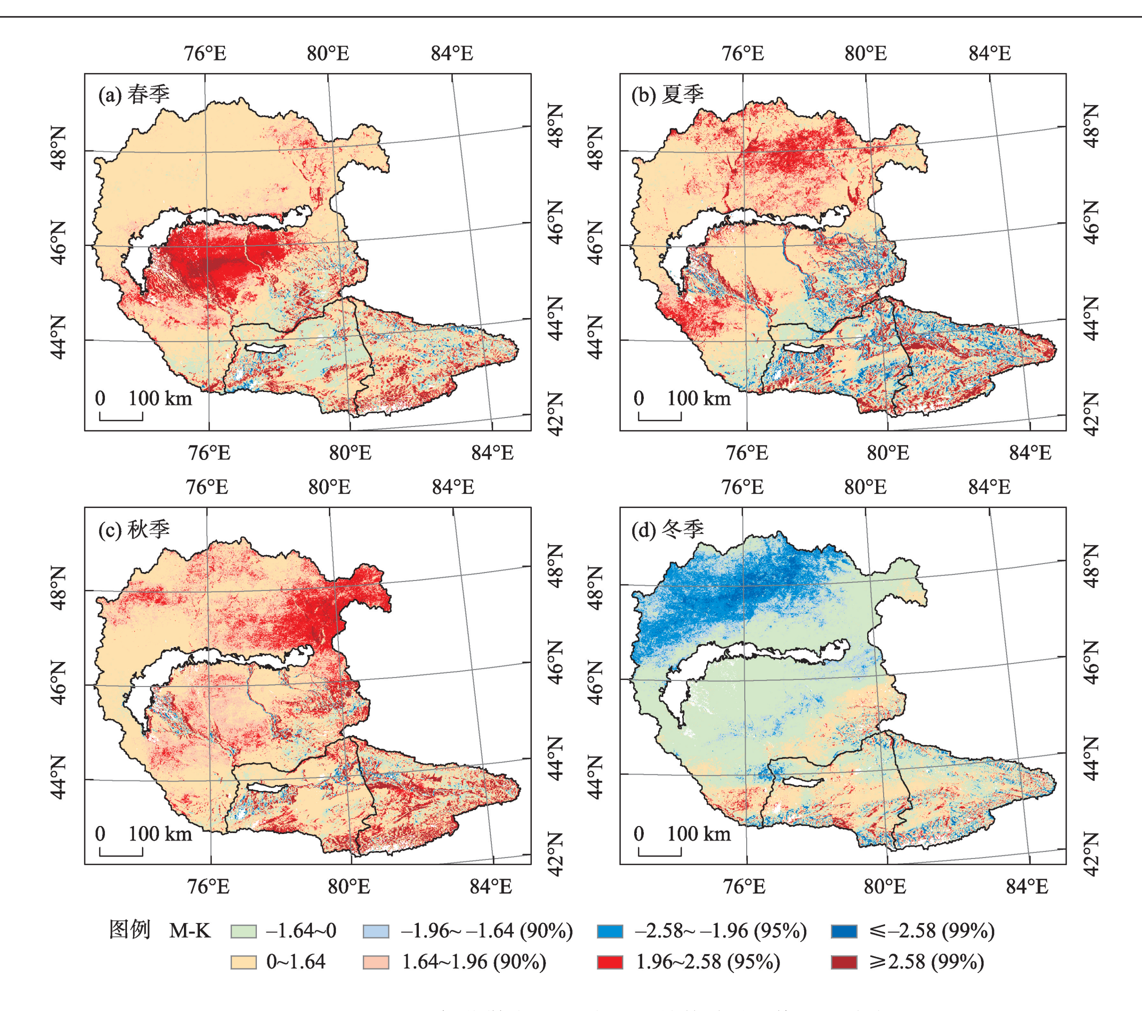


图7　2000—2020年蒸散发的四季M-K趋势检验Z值空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of the M-K trend test *Z*-values for the seasonal evapotranspiration from 2000 to 2020

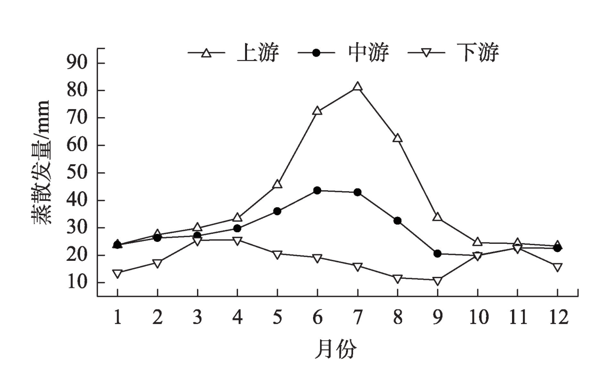


图8　2000—2020年多年平均蒸散发的年内分配

Fig. 8　Intra-annual distribution of multi-year average evapotranspiration from 2000 to 2020

秋(4—10月)季ET的年际变化率大于0,其中上游9月及下游4月和9月的ET变化率分别通过95%和99%的显著性检验。与其他3个季节相比,冬季(11月—次年3月)多数月份ET的年际变化率小于0且值较小,故对年ET的变化趋势影响不大。

2.1.4　ET年代际空间变化规律　由图9可知,在上游伊犁河谷地区和下游三角洲地区ET出现了显著增加,增幅超过了10%。三角洲周边区域ET增幅超过5%,这一变化趋势与图4的M-K的空间分布一致。在中下游交界处、卡普恰盖水库南部以及上游远离伊犁河谷的局部区域,年平均ET则出现了明显的下降,降幅超过5%。其中卡普恰盖水库南部ET下降幅度超过了5%,其原因可能是2005年后水库周边由ET值较大的耕地持续向ET值较小的天然植被转化[12,27]。

2.2　流域蒸散发影响因子变化特征

由图10可知,巴湖的北部和伊犁三角洲周边有大片的裸地变为草地,而在三角洲的内部则存在森林退化为草地。在上游较为明显的土地利用转换为草地变为林地,主要分布在天山山脉处,一定程度上解释了该地区蒸散发的上升,此外,草地变为人类占用地也是较为明显,这一点与刘婉如[28]和王宏伟等[29]的研究成果一致。

表1 2000—2020年月蒸散发的年际变化率

Tab. 1 Interannual trends in monthly evapotranspiration from 2000 to 2020 /(mm·a⁻¹)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
上游	0.011	−0.041	−0.038	0.264	0.191	0.239	0.455	0.249	0.25*	0.151	−0.039	0.020
中游	0.047	−0.036	0.040	0.247	0.272	−0.023	0.008	0.094	0.224	0.052	−0.033	0.019
下游	−0.112	−0.150	0.055	0.425**	0.178	0.284	0.245	0.148	0.267**	0.196	−0.086	−0.022

注:**通过99%显著性检验;*通过95%显著性检验。下同。

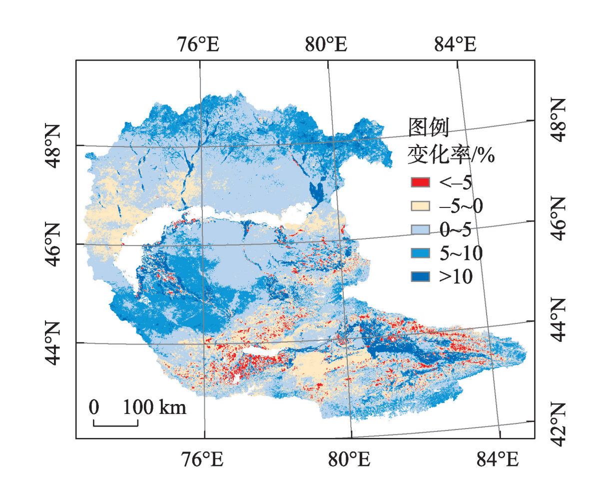
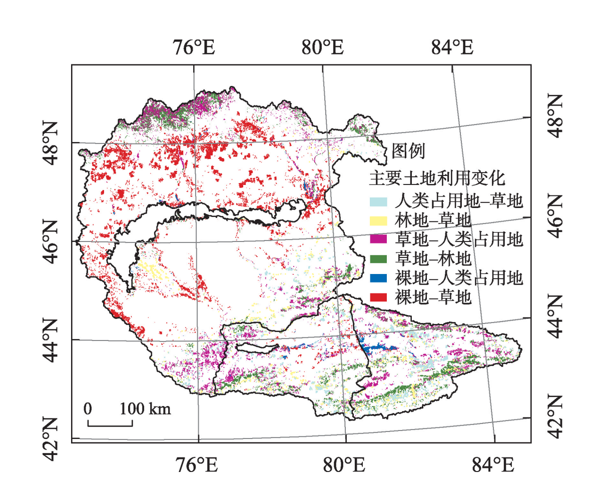


图9 2010—2020年相对2000—2010年多年平均年ET变化率

Fig. 9 2010−2020 relative to 2000−2010 multi-year average annual ET rate of change



注:图中仅显示面积变化>500 km²的土地利用变化类型。

图10 土地利用转移空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of land use transfer

由表2可知,全流域的风速在21 a内变化趋势不明显,而降水量与气温在21 a里呈下降趋势,其中,中游降水降幅为5.77 mm·a⁻¹,且通过95%的显著性检验。全流域的相对湿度、土壤湿度和NDVI均呈增加趋势,其中下游相对湿度与上、下游的NDVI增幅均通过95%的显著性检验,且NDVI的变化趋势与段伟利等[2]研究中得出的2000年后流域内荒地面积减少的趋势一致。降水和土壤湿度相反的变化趋势反映出可能是人类的引水灌溉活动造成土壤湿度的增大,这有助于干旱区植被的生长,且在一定程度上也促进了流域ET的增大。从图8、图11可以看出,上、中游ET的年内分配与气温和NDVI的年内分配相似,下游ET的年内分配则与土壤湿度和相对湿度的年内分配相似,且上、中游多山区,植被覆盖度较高,下游多平原且植被覆盖度较低,迥异的气候条件和地形地貌可能使上、中、下游的ET受不同因素影响。

2.3 不同区域ET的影响因素

MOD16的ET产品是基于Penman-Monteith(PM)公式[30]计算,运用PM公式需要气象、植被、土壤水分等条件[29−30]。学者们研究了基于PM公式的实际蒸散发的影响因素,发现不同地区ET的主要影响因素不同[31−32]。为明确影响本流域内ET变化的主要因素,本文基于Pearson相关系数法,计算月ET与5个环境影响要素的相关系数,得到相关系数的空间分布(表3、图12)。在流域的上、中游,NDVI和气温与ET达到中等程度正相关,并通过了99%的显著性

表2 2000—2020年间环境因子的年际变化率

Tab. 2 Interannual trends of environmental factors from 2000 to 2020

区域	降水量/(mm·a⁻¹)	相对湿度/(%·a⁻¹)	气温/(℃·a⁻¹)	风速/(m·s⁻¹·a⁻¹)	土壤湿度/(kg·m⁻² a⁻¹)	NDVI/(10a)⁻¹
上游	−1.65	0.06	−0.013	−0.002	0.27	0.016*
中游	−5.77*	0.09	−0.016	−0.003	0.10	0.010

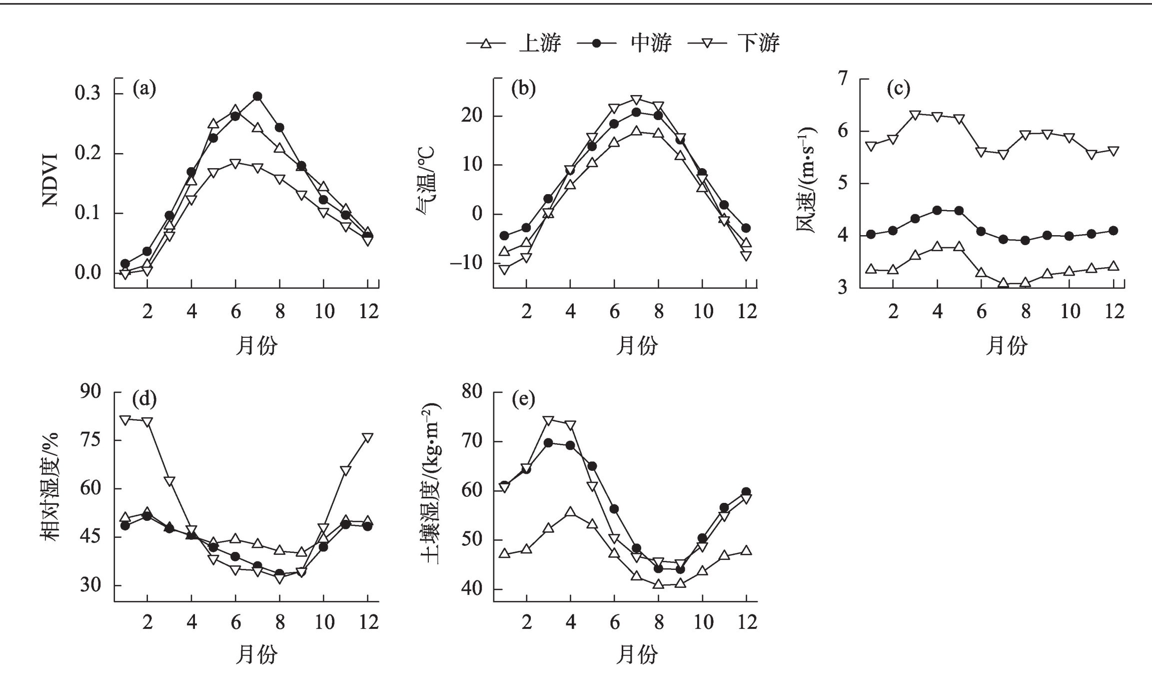


图11 2000—2020年多年平均环境影响因素的年内分配

Fig. 11 Intra-year distribution of multi-year average environmental impact factors from 2000 to 2020

检验,表明上、中游的ET可能主要受这2个因素影响,且会随着这2个因素的增大而增大。具体到特定区域来看,伊犁河谷地区蒸散发与气温呈显著的正相关,而天山山脉地区ET则同时与NDVI和气温均呈正相关(图12a,图12b)。在下游ET的影响因素中,仅有土壤湿度与ET达到低度正相关,故推测下游ET主要受土壤湿度控制,即一方面土壤水分增加改善植被生长条件促进植被蒸腾,另一方面也会促进土壤自身蒸发;根据PM公式,在其他条件不变的情况下,当土壤水分在凋萎系数和饱和含水量之间增加时,蒸散发所受的胁迫作用将减轻,土壤水分胁迫系数增大进而促使ET增大[33]。具体到特定区域来看,下游巴湖北岸和南岸的土壤湿度与ET的相关性分别达到了低度和中度相关,而在伊犁河三角洲的湿地沼泽区和阿克苏河与卡拉塔尔河上游的林地、耕地区域(图2b),土壤湿度与ET呈负相关或不相关关系,类似的现象也体现在相对湿度与ET的相关系数空间分布上。出现这种现象的原因可能是由于该区域较大的降雨量[34]或人为灌溉活动使得蒸散发所需的供水条件得到保障,供水条件(土壤湿度)不再是决定这些地区蒸散发的关键要素,而植被覆盖度和气温才是影响ET大小的主要因素。风速与ET的相关系数在大部分区域未通过95%的显著性检验,仅在局部地区与蒸散发呈现显著的相关关系(图12c),说明在多数地区,风速并不是ET的主要影响因素。

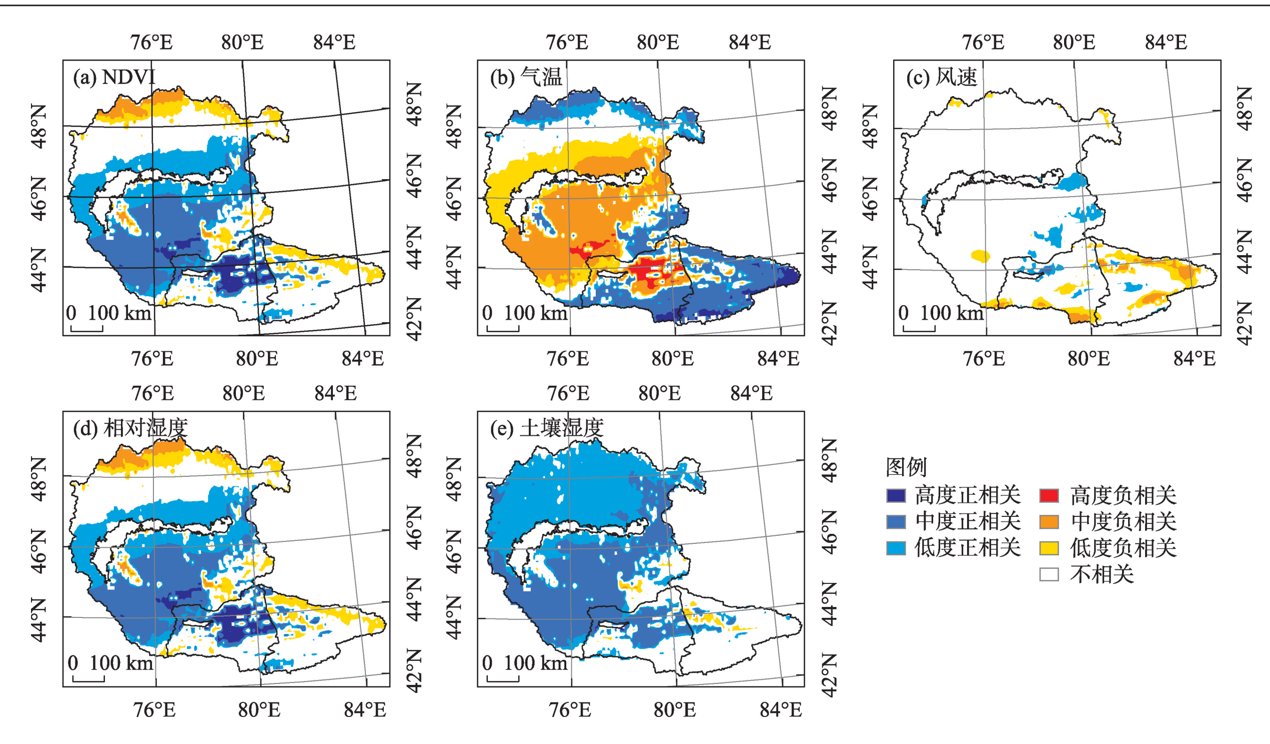
表3 流域上、中、下游蒸散发量与环境因子的相关性

Tab. 3 Correlation between evapotranspiration and environmental factors in the upper, middle and lower basin

影响因素	上游	中游	下游
NDVI	0.735**	0.681**	0.012
风速	−0.283**	−0.033	0.129*
温度	0.790**	0.552**	−0.129*
相对湿度	−0.288**	−0.095	0.160*
土壤湿度	−0.246**	−0.094	0.304**

3 讨论

梁红闪等[12]研究了伊巴流域2000—2014年ET的变化特征,认为流域总体呈下降趋势,且未来以持续性减少为主。而根据本文研究结果,全流域年ET的年际变化呈增加趋势,2000—2020年间的平均增幅为12.22 mm·(10a)$^{-1}$。图5说明了2014年后,流域上、中、下游年蒸散发量上升趋势明显,经计算上、中、下游2015—2020年年均值分别为466.59 mm、334.26 mm、217.38 mm,均显著大于2000—2014年年平均值(427.91 mm、311.36 mm、194.58



注: 仅显示通过95%显著性检验的数据。

图12 蒸散发与环境因子的相关系数的空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of correlation coefficients between evapotranspiration and environmental factors

mm)。ET的持续升高会直接影响到伊巴流域生态系统的水资源供给服务能力,故基于水量平衡原理,可以计算出流域生态系统水资源供给服务量在ET显著增加背景下的变化趋势(图13)。2000年来,流域的年降水量呈下降趋势(表2),而流域的年ET呈增加趋势(图4),这导致流域的生态系统水资源供给服务总量出现下降的趋势,其中中游的下降趋势最明显。此外,流域上游的生态系统水资源供给服务总量在一些年份已经出现了负值,到2020年这一缺口甚至达到了100 mm,而中、下游的生态系统水资源供给服务总量也在2020年出现了负值。近年来上游伊犁河谷地区的土地利用类型部分草地向耕地转变[28-29],在一定程度上加剧了水资源的消耗。中游地区随着卡普恰盖水库的建立,周边区域的草地等几乎全部逐渐转变为农业用地,加剧了中游地区水资源的消耗,同时对维持巴湖水位也会造成不利影响[2];1991年后,中、下游的许多耕地面积处于撂荒状态,后经过一系列土地改革措施[35-37],耕地面积开始大大增加,与此同时,下游巴湖附近的许多裸地也开始向草地转变,土地覆被的变化也驱动了蒸散发量的增大。

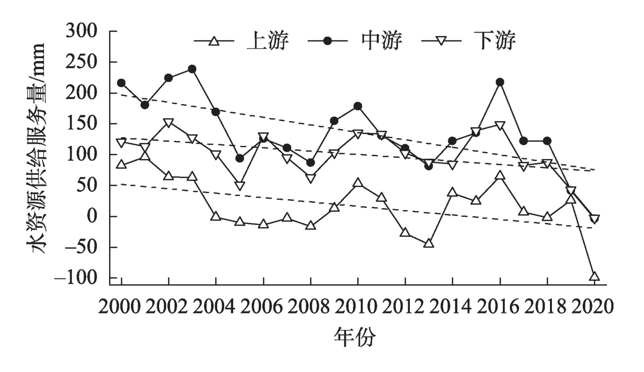


图13 2000—2020年生态系统的水资源供给服务量的年际变化

Fig. 13 Interannual variation in water supply services of ecosystems from 2000 to 2020

4 结 论

为了研究伊巴流域ET的演变规律及其环境影响因素,利用MOD16产品结合NDVI、气象数据和土壤湿度等数据得到以下结论:

(1) 伊巴流域2000—2020年年ET在空间上呈现自上游向下游逐渐减少的分布,上、中、下游多年平均年ET分别为439.0 mm、317.9 mm、201.1 mm,比例近似4:3:2。其中上、中游在夏季的日蒸散发量最大,而下游在春季最大。流域上中游蒸散发量的年

内分配均为“单峰型”,峰值分别在7月与6月,下游为“双峰型”,峰值分别在3月与11月。

(2)下游的年ET均呈显著上升趋势,显著区域主要分布在上游的伊犁河谷、天山山脉与下游的伊犁河三角洲附近;相对2000—2010年,2010—2020年伊犁河谷和伊犁河三角洲地区多年平均年ET增加超过10%。

(3)中游蒸散发与气温和NDVI呈较高的正相关性;流域下游蒸散发与土壤湿度呈低度正相关。

(4)受到实际蒸散发的显著增加和降雨量减少的影响,流域生态系统水资源供给服务总量在2000—2020年有所下降,其中上游已多次出现缺口,中、下游在2020年开始出现缺口,急需通过控制用水总量、提升用水效率保障水资源供需平衡。

参考文献(References):

[1] 邓铭江, 王志杰, 王姣妍. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 403-413. [Deng Mingjiang, Wang Zhijie, Wang Jiaoyan. Analysis of Balkhash Lake ecological water level evolvement and its regulation strategy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 404-413.]

[2] 段伟利, 邹珊, 陈亚宁, 等. 1879-—2015年巴尔喀什湖水位变化及其主要影响因素分析[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 950-961. [Duan Weili, Zou Shan, Chen Yaning, et al. Analysis of water level changes in Lake Balkhash and its main influencing factors during 1879-2015 [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 950-961.]

[3] 孙佳龙, 郭金运, 常晓涛, 等. 利用卫星测高和重力的巴尔喀什湖水位变化监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 401-406. [Sun Jialong, Guo Jinyun, Chang Xiaotao, et al. Balkhash Lake level variations monitored with satellite altimeter and satellite gravity data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(4): 401-406.]

[4] 谢蕾, 龙爱华, 邓铭江, 等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1330-1340. [Xie Lei, Long Aihua, Deng Mingjiang, et al. Study on ecological water consumption in delta of the lower reaches of Ili River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1330-1340.]

[5] 郑青华, 罗格平, 朱磊, 等. 基于CA_Markov模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 873-882. [Zheng Qinghua, Luo Geping, Zhu Lei, et al. Prediction of landscape patterns in Ili River Delta based on CA_Markov model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 873-882.]

[6] 李修仓. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [Li Xiucang. Spatio-temporal Variation of Actual Evapotranspiration in the Pearl, Haihe and Tarim River Basins of China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]

[7] 刘洋, 于恩涛, 杨建军, 等. 西北干旱区1960—2019年实际蒸散发时空变化特征 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 75-80, 89. [Liu Yang, Yu Entao, Yang Jianjun, et al. Characteristics of spatial and temporal variation of actual evapotranspiration in the arid region of northwest China from 1960 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 75-80, 89.]

[8] Xia Jiangzhou, Liang Shunlin, Chen Jiquan, et al. Satellite-based analysis of evapotranspiration and water balance in the grassland ecosystems of dryland East Asia[J]. PLOS ONE, 2014, 9(5): e97295.

[9] Zhang Shengwei, Shen Rui, Zhao Hongbin, et al. Correlating between evapotranspiration and precipitation provides insights into Xilingol grassland eco-engineering at larger scale[J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 100-103.

[10] 闫俊杰, 付秀东, 赵玉, 等. 2001—2015年伊犁河谷草地蒸散发时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 184-190, 197. [Yan Junjie, Fu Xiudong, Zhao Yu, et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration in the grassland of Ili valley from 2001 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 184-190, 197.]

[11] 邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉, 等. 2000—2014年天山山区蒸散发时空动态特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 266-273. [Deng Xingyao, Yao Junqiang, Liu Zhihui, et al. Spatiotemporal dynamic change characteristics of evapotranspiration in Tianshan Mountains from 2000 to 2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 266-273.]

[12] 梁红闪, 王丹, 郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100-110. [Liang Hongshan, Wang Dan, Zheng Jianghua. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration in the Ili River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 100-110.]

[13] 肖婷婷, 夏自强, 郭利丹, 等. 巴尔喀什湖流域1936-2005年气温特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 391-396. [Xiao Tingting, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Temperature characteristics in the Balkhash Lake Basin from 1936 to 2005[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2011, 39(4): 391-396.]

[14] 夏自强, 郭利丹, 黄峰, 等. 巴尔喀什湖-阿拉湖流域水文地理特征分析及人类活动影响研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 43, 53. [Xia Ziqiang, Guo Lidan, Huang Feng, et al. Analysis of Hydrographic Characteristics of the Lake Balkhash-Ala Lake Basin and Study of the Impact of Human Activities [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.]

[15] 李元春, 葛静, 侯蒙京, 等. 基于CCI-LC数据的甘南和川西北地区土地覆盖类型时空动态分布及草地面积变化驱动力研究[J]. 草业学报, 2020, 29(3): 1-15. [Li Yuanchun, Ge Jing, Hou Mengjing, et al. A studly of the spatiotemporal dynamic of land cover types and the driving forces of grass and area change in Gan-

nan Prefecture and Northwest Sichuan based on CCI- 1C data[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(3): 1-15.]

[16] Mann Henry B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945: 245-259.

[17] Kendall Maurice George. Rank Correlation Methods[M]. 5th Edition. London: Edward Arnold: 1990.

[18] 徐勇, 黄雯婷, 靖娟利, 等. 京津冀地区植被NDVI动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 319-327. [Xu Yong, Huang Wenting, Jin Juanli, et al. Dynamic variation of vegetation cover and its relation with climate variables in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 319-327.]

[19] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550. [Liu Rui, Zhu Daolin, Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.]

[20] Pearson Karl. Notes on the history of correlation[J]. Biometrika, 1920, 13(1): 25-45.

[21] 邱国玉, 熊育久. 水与能: 蒸散发, 热环境及其能量收支[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Qiu Guoyu, Xiong Yujiu. Evapotranspiration Thermal Environment and Energy Budget[M]. Beijing: Science Press, 2014.]

[22] 詹云军, 章文, 严岩, 等. 长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(17): 6924-6935. [Zhan Yunjun, Zhang Wen, Yan Yan, et al. Analysis of actual evapotranspiration evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6924-6935.]

[23] 王倩, 杨太保, 杨雪梅. 新疆伊犁河流域植被变化动态监测与评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 126-131. [Wang Qian, Yang Taibao, Yang Xuemei. Monitoring and assessment of vegetation variation over the Ili River Basin in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 126-131.]

[24] 魏良民, 高明, 贾青德, 等. 新疆丸粒种甜菜适宜播种时间试验[J]. 中国糖料, 2014(1): 24-26. [Wei Liangmin, Gao Ming, Jia Qingde, et al. Suitable sowing time experiment of pellet sugarbeet seed in Xinjiang[J]. Sugar Crops of China, 2014(1): 24-26.]

[25] 李杜娟. 伊犁地区红花栽培技术[J]. 现代农业科技, 2018(19): 98, 103. [Li Dujuan. Cultivation technology of safflower in Ili region[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(19): 98, 103.]

[26] Thevs Niels, Nurtazin Sabir, Beckmann Volker, et al. Water consumption of agriculture and natural ecosystems along the Ili River in China and Kazakhstan[J]. Water, 2017, 9(3): 207.

[27] 蔡明勇, 杨胜天, 周秋文, 等. 伊犁河跨界流域土地利用变化特征分析[J]. 世界地理研究, 2013, 22(3): 151-159. [Cai Mingyong, Yang Shengtian, Zhou Qiuwen, et al. Land use/cover change analysis in transboundary Ili River Basin[J]. World Regional Studies, 2013, 22(3): 151-159.]

[28] 刘婉如, 陈春波, 罗格平, 等. 巴尔喀什湖流域土地利用/覆被变化过程与趋势[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1452-1463. [Liu Wanru, Chen Chunbo, Luo Geping, et al. Change process and trends pf land use/cover in Balkhash Lake basin[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1452-1463.]

[29] 王宏伟, 张小雷, 乔木, 等. 基于GIS的伊犁河流域生态环境质量评价与动态分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 215-221. [Wang Hongwei, Zhang Xiaolei, Qiao Mu, et al. Assessment and dynamic analysis of the eco-environmental quality in the Ili River Basin based on GIS[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 215-221.]

[30] 贺添, 邵全琴. 基于MOD16产品的我国2001—2010年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988. [He Tian, Shao Quanqin. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(6): 979-988.]

[31] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Steven W. Running. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

[32] Mu Qiaozhen, Faith Ann Heinsch, Zhao Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.

[33] 赵玲玲. 流域水文循环模拟中蒸散发估算方法研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. [Zhao Lingling. A study of Evapotranspiration Estimation Methods in Watershed Hydrological Cycle Simulation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.]

[34] 张潇, 夏自强, 郭利丹, 等. 1960-2010年巴尔喀什湖流域干湿特征分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1118-1128. [Zhang Xiao, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Analysis of aridity-wetness characteristics in the Balkhash Lake Basin from 1960 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1118-1128.]

[35] 刘燕平. 哈萨克斯坦土地管理机构及法律法规[J]. 国土资源情报, 2008(3): 22-25. [Liu Yanping. Land Management Institutions and Laws of Kazakhstan[J]. Land and Resources Information, 2008 (3): 22-25.]

[36] Beurs K M, Henebry G M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 497-509.

[37] Henebry G M, De Beurs K M, et al. Land surface dynamics in Kazakhstan: Dynamic baselines and change detection land surface dynamics in Kazakhstan: Dynamic baselines and change detection [C]//IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2002: 1060-1062.

Spatial and temporal variability of evapotranspiration and influencing factors in the Ili River-Balkhash Lake Basin

YAO Jia[1], CHEN Qihui[1], LI Qiongfang[1,2], CUI Gang[1], ZHANG Liangjing[3]

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Green Development, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu)

Abstract: From 2000 to 2020, remote sensing data, such as MODIS and FLDAS, the Mann-Kendall method, Theil-Sen median trend analysis, Pearson correlation analysis, and the water balance principle, were applied to explore the spatial distribution and temporal variation patterns of actual evapotranspiration in the Ili River-Balkhash Lake basin, along with its main influencing factors. In addition, changes in the ecosystem water supply were discussed. The results were as follows: (1) the upper, middle, and lower Ili River-Balkhash Lake basins had an average annual evapotranspiration of 439.0 mm, 317.9 mm, and 201.1 mm, respectively. The daily evapotranspiration in the upper and middle basins was the greatest in the summer, while the lower basin had the greatest daily evapotranspiration in the spring. The intra-annual distribution of evapotranspiration in the upper and middle basins was “unimodal,” with peaks in July and June, respectively. It was “bimodal” in the lower basin, with peaks in March and November, respectively. (2) The annual evapotranspiration increased in both the upper and lower basins, with the highest concentrations in the upper Ili River valley, Tianshan Mountains, and near the Ili River delta in the lower basin. Compared to the 2000s, the average annual evapotranspiration in the Ili River valley and Ili River delta increased by more than 10% in the 2010s. (3) Based on the Pearson correlation analysis, the upper and middle basins showed high positive correlations with temperature and NDVI, whereas the lower basin showed high positive correlations with soil moisture. (4) From 2000 to 2020, the basin's total water supply service decreased, with several shortfalls in the upper basin and shortfalls in the middle and lower basins beginning to appear in 2020. The balance of water supply and demand must be ensured by controlling the total amount of water being used and by improving water use efficiency.

Keywords: Ili River-Balkhash Lake Basin; evapotranspiration; temporal and spatial changes; driving factors; Pearson correlation analysis.